[电抗器]

深度限流装置和相关保护的整定及定值配合方式

文/浙江浙能技术研究院有限公司　赵慧勉

深度限流装置的装设能保护断路器及变压器等主设备不受大电流的冲击。以实际案例为基础，通过对系统故障计算、限流电抗器参数的选择和限流装置控制参数的整定等方面进行分析探讨，提出优化建议，从而保证深度限流装置在实际运用中准确有效地与系统保护配合。

深度限流装置介绍

1. 装置原理

深度限流装置主体结构包括VFC高速真空断路器（快速开关）、限流电抗器及其控制系统。装置的使用方式为串接于电源单元输出回路，如图1所示。系统正常运行期间，VFC高速真空断路器处于闭合状态，装置控制系统通过电流互感器监视该单元回路电流，一旦出现下接回路故障，则电流互感器检测到的电流大于装置预先设定值，控制系统即发出跳快速换流开关指令，并在7～15 ms时间内断开VFC高速真空断路器，将限流电抗器投入运行。投入限流电抗器可迅速限制该单元短路电流，同时避免母线电压过度下沉。当故障消失或切除后，限流装置控制系统检测到电流小于设定的返回值，VFC高速真空断路器合闸，限流电抗器退出回路，系统恢复正常。

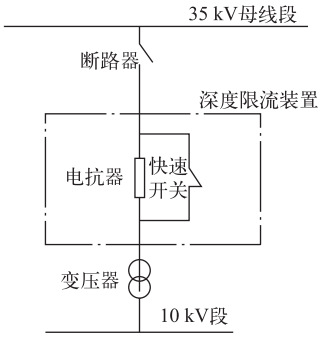

图1　电源单元输出回路

此外，限流装置内部还设置以下用于自身保护的动作逻辑，逻辑图如图2所示。

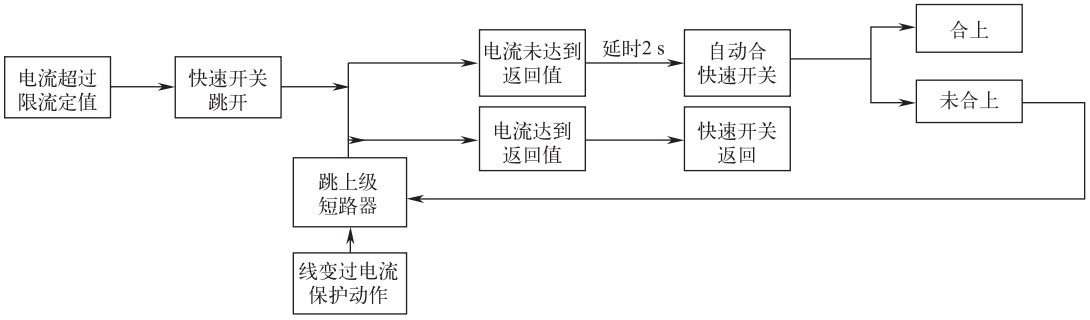

图2　逻辑图

1）若在限流装置投入后一段时间内检测到故障电流仍存在，则装置发出闭合VFC高速真空断路器信号，退出限流电抗器。

2）在上文的前提下，若此时VFC高速真空断路器返回失败，为了保护限流电抗器不过热，装置经一定延时后，发动作信号联跳上级断路器。

2．保护参数定值含义

深度限流装置需整定的定值有装置动作值、装置返回值、装置自动返回时间和保护拒动作联跳电源开关延时四个，各自的含义见下表。

表　深度限流装置需整定的四个定值

动作值I_d	用于检测被保护单元发生故障。当线路电流大于动作值时，装置起动断开换流开关，投入限流电抗器
返回值I_f	当线路电流小于返回值时，判断故障电流消失。装置发合换流开关指令，开关合上，退出限流电抗器
自动返回时间T_1	装置起动后，故障电流未消失，即故障没有被切除，装置延时T_1秒合换流开关，自动退出电抗器
保护拒动作联跳电源开关延时T_2	当限流装置换流开关拒合时，经T_2延时跳开上级电源断路器

应用案例

某化工厂自备电站共有三台60 MW发电机，分别通过三台升压变压器升压至35 kV，供电给35 kV母线。110 kV电网系统通过两台主变压器为35 kV母线提供电源。35 kV配电系统各负荷出线（线变组）单元均装设ZLB零损耗深度限流装置。系统接线图如图3所示。

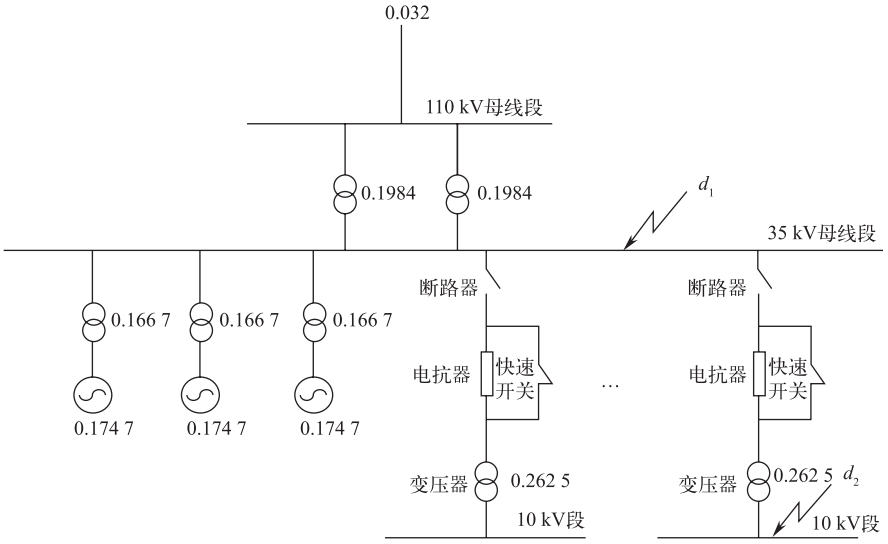

图3　系统图

各化工单元线变组配有南瑞RCS-9618型综合保护装置，该综保配置差动速断、三段式过电流保护。

系统设定最大运行方式为三台发电机、两台主变压器同时运行，最小运行方式为一台发电机、两台主变压器同时运行。

案例整定计算

1. 短路电流计算

计算短路电流选取基准值为

$$S_j=100\ \text{MV·A}$$

$$U_j=37\ \text{kV}$$

$$I_j=\frac{S_j}{\sqrt{3}U_j}=1.560\ 4\ \text{kA}$$

$$R_j=\frac{U_j^2}{S_j}=13.69\ \Omega$$

110 kV侧阻抗标幺值为

$$X_{c*}=\frac{S_j}{S_c}=0.032\ 2$$

发电机阻抗标幺值为

$$X_{F*}=U_d\times100\times\frac{S_j}{100\times\frac{P_e}{\cos\varphi}}=0.174\ 7$$

主变压器阻抗标幺值为

$$X_{T1*}=U_d\times100\times\frac{S_j}{100\times S_e}=0.198\ 4$$

升压变压器阻抗标幺值为

$$X_{T2*}=U_d\times100\times\frac{S_j}{100\times S_e}=0.166\ 7$$

负荷侧变压器阻抗标幺值为

$$X_{d*}=U_d\times100\times\frac{S_j}{100\times S_e}=0.262\ 5$$

3.8 km电缆阻抗标幺值为

$$Z_{kl*}=\sqrt{R_1^2\quad X_1^2}\times3.8\times\frac{S_j}{U_j^2}=0.073\ 4$$

短路电流计算结果如下。

最大运行方式下35 kV母线d_1点三相短路时短路电流为

$$I_{max1}=\frac{I_j}{X_{c*}+0.5X_{T1*}}+3\times\frac{I_j}{X_{F*}+X_{T2*}}=25.586\ \text{kA}$$

最大运行方式下负荷侧变压器低压侧d_2点三相短路时短路电流为

$$I_{max2}=\frac{I_j}{\frac{I_j}{I_{max1}}+X_{d*}}=4.83\ \text{kA}$$

最小方式运行时d_1点两相短路时短路电流为

$$I_{min1}=\frac{\sqrt{3}}{2}\times\left(2\times\frac{I_j}{X_{c*}+X_{T1*}}+\frac{I_j}{X_{F*}+X_{T2}}\right)=13.83\ \text{kA}$$

最小方式运行时d_2点两相短路时短路电流为

$$I_{min2}=\frac{\sqrt{3}}{2}\times\left(\frac{I_j}{\frac{\sqrt{3}}{2}\times\frac{I_j}{I_{min1}}+X_{d*}}\right)=3.751\ \text{kA}$$

最小方式运行时，变压器高压侧最远端两相短路电流为

$$I_{min3}=\frac{\sqrt{3}}{2}\times\left(\frac{I_j}{\frac{\sqrt{3}}{2}\times\frac{I_j}{I_{min1}}+Z_{kl*}}\right)=7.89\ \text{kA}$$

2. 限流装置整定

（1）电抗器阻值设定

限流装置除了限流特性外，还同时具备稳压特性，装置的稳压特性可以通过限流装置电抗器阻值的大小来决定。为避免非故障下接负荷设备开关接触器在系统故障情况中因暂态电压过低返回，母线残压通常要保证额定电压的70%以上，考虑最小方式故障下母线残压不低于额定电压75%的裕度。最小系统方式下限流装置出口短路时，投入限流装置母线残压V_{c1}计算式为

$$\frac{X_{sd*}}{X_{min1*}+X_{sd*}}=75\%$$

$$X_{sd*}=0.293\ 1$$

式中，X_{min1*}是最小方式下系统阻抗标幺值；X_{sd*}为深度限流电抗器电抗标幺值。

当限流装置出口短路，限流装置投入电抗器，设置深度限流电抗器电抗值不小于4.01 Ω时，母线残压能保持额定电压的75%，从而保证非故障设备稳定运行。

（2）装置动作值

装置动作值用于检测保护单元发生故障。当线路电流大于动作值时，换流开关断开，限流电抗器投入运行。本例中断路器额定短路开断电流为31.5 kA，大于最大方式下线路的短路电流25.58 kA。断路器容量满足开断最大短路电流的要求，但介于在大电流情况下多次开合对断路器使用寿命产生影响，所以应通过深度限流装置尽量减少断路器在故障发生时的开断电流。

限流装置保护范围的选定应考虑以下三点：

1）变压器低压侧三相最大故障电流I_{max2}=4.83 kA，已经远小于断路器额定短路开断电流31.5 kA，从限制电流角度不必考虑变压器低压侧及以下线路出现短路的情况。

2）若限流装置动作范围延伸到下级负荷，当下级负荷出现故障时，限流装置投入，下级开关跳闸后，限流装置返回。增加了限流装置的投入次数，不利于限流装置的使用寿命。

3）若限流装置动作范围延伸到下级负荷，当下级负荷出现故障并且限流装置动作时，因为限流装置设有“装置动作后未能自动返回则延时联跳上级断路器”的逻辑，限流装置动作次数增大，增加系统越级跳闸的风险。

因此限流装置的保护范围考虑最远保护到变压器低压侧，其动作值考虑按躲过变压器低压侧三相最大故障电流来整定，计算式为

$$I_d=I_{max2}k=5.796\ \text{kA}$$

式中，k为可靠系数，取值1.2倍。

限流装置动作值取值5.796 kA，短路电流小于该动作值时限流装置不动作，在限流保护装置外故障时，母线最大残压U_c为

$$U_{c2}=(1-\frac{X_{min1*}}{I_j/I_d})\times U_j=63\times U_j$$

（3）装置返回值

限流装置返回值的设定应参照线路正常运行时的最大负荷电流，可按断路器额定电流来整定。在整定中设置一定的可靠系数，用于防止装置快速开关误返回。可靠系数可设为1.5倍，计算式为

$$I_f=\frac{40\ \text{MW}}{\sqrt{3}\times 35\ \text{kV}}\times 1.5=990\ \text{A}$$

（4）装置时间参数

在装置自动返回的延时时间T_1、保护拒动作联跳电源开关延时T_2的整定上需考虑限流装置电抗器的耐热（热稳定）最大允许工作时间，通常电抗器可以承受电流的时间为2 s。T_1为装置等待保护动作切上级断路器的时间，T_2为装置自动退出电抗器失败后联跳上级断路器的动作延时。T_1+T_2为限流装置电抗器投入的最大可能时间。在整定中需保证T_1+T_2＜2 s。实际整定中可以设置0.95倍可靠系数，即

$$T_1+T_2=1.9\ \text{s}$$

装置自动返回的延时时间T_1在整定中应考虑上级断路器的动作时间。延时时间T_1整定的原则是保证线变组保护动作完成后装置再自动返回，故应大于线变保护的时间。因装置考虑在35 kV末端故障时可靠动作，装置返回延时可以与线变组保护过电流二段的动作延时时间配合。过电流二段的动作时间可以与下级负荷断路器按0.3 s级差整定，本例中考虑有四级，过电流二段动作整定为1.5 s。考虑到断路器装置本身动作时间，需设置一定的裕度。

保护拒动作联跳电源开关延时T_2在整定时，需考虑躲过换流开关合闸时间。根据经验值，开关合闸时间约为0.1 s，故整定值应不小于0.1 s。为了防止限流装置无故影响线路正常运行，可适当增长T_2的时间。考虑设可靠系数2，得T_2=0.2 s。则装置自动返回的延时时间T_1可根据整定逻辑整定为1.7 s。

3. 综保保护整定

各负荷出线综保配置有差动速断保护、三段式过电流保护。

（1）差动保护整定

差动保护整定原则：躲过区外故障最大不平衡电流。保护范围包括从断路器下端口到变压器低压侧。当在差动保护范围内发生故障时，深度限流装置的投入与否不影响差动保护的正确，故其保护按照常规配置投运。

（2）过电流一段整定

过电流一段在整定时应考虑躲过低压侧最大方式下三相短路电流，过电流速断动作值计算式为

$$I_{g1}=I_{max2}k=6.279\ \text{kA}$$

式中，k为可靠系数，取值1.3倍。

速断动作值（6.279 kA）较限流装置动作值I_d整定值（5.796 kA）大。当过电流一段保护动作时，深度限流装置动作，限流装置快速开关约7～15 ms时间内开断，切入电抗器，短路电流下降速断，动作时间比过电流速断保护动作断路器时间20～40 ms更加迅速。若故障发生深度限流装置正常投入时，过电流一段保护不会动作。若深度限流装置在故障发生时出现拒动作情况，因线路已设置差动速断保护，过电流一段可退出运行。

（3）过电流二段整定

过电流二段在整定中不选择复压过电流的方式。因为当限流装置投入时，母线低电压不能满足条件。过电流二段整定值在整定中应考虑躲过下接负荷最大自起动电流，自起动电流的计算式为

$$I_{st.\Sigma}=\frac{I_j}{X_s+X_T+X_{st.\Sigma}}$$

$$X_{st.\Sigma}=\frac{S_{st.\Sigma}}{K_{st.\Sigma}S_{M.N.\Sigma}}$$

式中，X_s为系统阻抗标幺值；X_T为变压器阻抗标幺值；$X_{st.\Sigma}$为电动机自起动综合阻抗标幺值，计算中取电动机自起动倍数$K_{st.\Sigma}$为5；电动机自起动容量$S_{st.\Sigma}$为60%的变压器额定容量$S_{M.N.\Sigma}$，则

$$I_{st.\Sigma}=2.127\ 5\ \text{kA}$$

过电流二段取值为

$$I_{g2}=I_{st.\Sigma}k=2.553\ \text{kA}$$

式中，k为可靠系数，取值1.2倍。

灵敏度计算为

$$K_{LM1}=\frac{I_{min2}}{I_{g2}}\times 1.47>1.3$$

灵敏度满足保护要求。

在按各自的整定原则整定出动作值后，需考虑过电流二段保护、限流装置动作能否配合。考虑过电流二段有1.5 s的动作延时，故障发生时限流装置会先于过电流二段投入。需要故障电流在限流装置

投入后仍能高于过电流二段动作值，从而保证过电流二段不会因为限流装置的投入而不动作。

限流装置投入后，线路上的电流I_{tr}计算式为

$$I_{tr}=\frac{I_j}{\frac{I_j}{I_d}+X_{sd*}}=2.774\ 9\ \text{kA}$$

限流装置投入后，电流2.774 9 kA大于过电流二段动作电流2.553 kA，故限流装置投入不会导致过电流二段拒动作。

当故障发生时仅需考虑限流装置保护动作范围内的动作灵敏度，该保护范围最末端灵敏度K_{LM2}计算式为

$$K_{LM2}=\frac{I_{tr}}{I_{g2}}=1.08$$

该灵敏度较小，小于过电流要求的灵敏度1.3，表明过电流二段不能对限流装置动作范围的末端一部分进行可靠保护。

（4）过电流三段整定

过电流三段可整定为过负荷保护，作为电源变压器过负荷的异常保护，其动作值考虑躲过变压器最大额定电流，延时时间按躲过后备保护的最大时间，动作方式为发信。限流装置动作为短路故障下的投切，不影响其保护的功能。

（5）过电流反时限整定

过电流反时限保护可用于弥补过电流二段与限流装置配合的不足，动作方程选用式为

$$t=\frac{80}{(I/I_p)^2-1}t_p$$

动作电流整定值I_p的计算式为

$$I_p=KI_j$$

式中，K为可靠系数，取1.2倍。

动作时间t考虑躲过电动机自起动时间。

结束语

限流装置在参数设置时需要考虑该设置是否满足要求的限流、稳压的效果，另外还应考虑装置如何和原有的线变组保护合理配合，保障该线路的安全稳定运行。本文通过案例计算对限流装置的各参数的选择以及线变组保护的整定进行深入分析，得出结论如下。

1）为满足深度限流装置稳压的功能，应合理选择电抗器阻抗百分值（等效电抗值）。系统故障时，电抗器能以最短时间（7～15 ms）快速投入，恢复电源母线电压至控制值。在整定中应计算系统小方式下装置出口短路时，电源母线残压能达到希望值时的串入电抗器电抗值。设置该电抗值为限流电抗百分比。

2）限流装置的动作值主要从限流性能的角度进行整定。整定时需考虑断路器分断能力与系统最大短路电流的关系。若分断能力大于系统最大短路电流，说明限流效果不明显，但投入装置可以增加限流装置的使用寿命，仍可对动作值进行整定。整定时考虑到若动作范围整定到低压侧以下装置，短路电流过小，装置起动返回过于频繁，增加了越级联跳上级断路器的风险等问题，建议限流装置的动作范围最远至变压器二次侧，动作值按躲过变压器二次侧三相最大故障电流来整定。

3）限流装置返回值应参照线路正常运行时的最大负荷电流，可按断路器额定电流来整定。

4）限流装置的自动返回的延时时间为限流装置投入后自动返回快速开关的延时，该延时应与过电流二段延时时间配合整定，确保过电流二段动作后快速开关返回。

5）限流装置的保护拒动作联跳电源开关延时，是当限流装置换流开关拒合时，跳开上级电源断路器的延时，该延时应和换流开关合闸时间配合，整定时取一定的裕度，保证不错误联跳上级断路器。

6）过电流一段保护为电流速断保护，按躲过变压器低压侧三相最大故障电流来整定。因为限流装置的电流动作值大于速断动作值，且动作时间快于过电流一段速断保护的动作时间，所以该保护与限流装置配合时，不会动作。考虑到过电流一段在各种情况下均不能动作，建议退出此段保护。

7）过电流二段保护的动作值应按躲过下接负荷最大自起动电流整定，需通过与限流装置投入后电流值进行比较计算出该保护的灵敏度。若保护灵敏度不够，最末端部分可用线变组保护自带的反时限保护来进行弥补。

8）差动速断与过电流三段的整定不受限流装置的影响，按正常方式整定。**EA**

（收稿日期：2021.07.16）